

**О.В. ШУТЕНКО, А.А. ЗАГАЙНОВА****ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ВВОДОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ВО ВРЕМЕНИ**

В статье приведены результаты исследования зависимостей показателей изоляции от продолжительности эксплуатации для исправных и неисправных высоковольтных маслонаполненных вводов как герметичной, так и негерметичной конструкции. Для исследований использовались математические модели дисперсионного анализа линейной регрессии, модель парного регрессионного анализа и корреляционный анализ. По результатам исследований установлено, что в высоковольтных вводах с разным состоянием имеет место не только различие в численном значении показателей изоляции, что известно и широко используется, но и существенное различие в динамике изменения показателей во времени, что может быть использовано для диагностики состояния высоковольтных вводов.

**Ключевые слова:** высоковольтные вводы, длительность эксплуатации, исправное состояние, неисправное состояние, динамика изменения показателей во времени, ковариационный анализ, регрессионный анализ, систематическая составляющая, случайная составляющая, корреляция.

**О.В. ШУТЕНКО, О.А. ЗАГАЙНОВА****ДІАГНОСТИКА СТАНУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ МАСЛОНАПОВНЕНИХ ВВОДІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ДИНАМІКИ ЗМІНИ ПОКАЗНИКІВ ІЗОЛЯЦІЇ В ЧАСІ**

У статті наведені результати дослідження залежностей показників ізоляції від тривалості експлуатації для справних і несправних високовольтних маслонаповнених вводів як герметичної, так і негерметичної конструкції. За результатами досліджень встановлено, що в високовольтних вводах з різним станом має місце не тільки відмінність в чисельному значенні показників ізоляції, що відомо і широко використовується, але і велика різниця в динаміці зміни показників у часі, що може бути використано для діагностики стану високовольтних вводів.

**Ключові слова:** високовольтні вводи, тривалість експлуатації, справний стан, несправний стан, динаміка зміни показників у часі, коваріаційний аналіз, регресійний аналіз, систематична складова, випадкова складова, кореляція.

**O. SHUTENKO, A. ZAGAYNOVA****DIAGNOSTICS OF THE STATE OF HIGH-VOLTAGE BUSHINGS BASED ON THE CHANGES DYNAMICS ANALYSIS IN THE INDICATORS OF INSULATION IN TIME**

The article presents the results of the study of the insulation dependence performance on the duration of operation for serviceable and faulty high-voltage oil-filled bushings of both sealed and leak-proof design. Mathematical models of variance analysis of linear regression, model of pair regression analysis and correlation analysis were used for research. According to the research results, it was found that in high-voltage bushings with different States there is not only a difference in the numerical value of the insulation indicators, which is known and widely used, but also a significant difference in the dynamics of the indicators in time. So for serviceable high-voltage bushings is characterized by the practical absence of a significant systematic component in the dependence of indicators on the duration of operation, the practical absence of a significant correlation between the indicators, as well as the presence of a significant correlation between the indicators of isolation bushings installed on adjacent phases. For faulty high-voltage bushings is characterized by the presence of a significant systematic component in the dependence of the indicators on the duration of operation, the presence of a significant correlation between the insulation indicators, as well as the lack of a significant correlation between the indicators of faulty bushing and indicators of serviceable bushings installed on adjacent phases. The revealed differences can be used for early diagnosis of the insulation state of high-voltage bushings.

**Keywords:** high-voltage bushing, operation duration, good condition, fault condition, dynamics of changes in indicators over time, covariance analysis, regression analysis, systematic component, random component, correlation.

**Постановка проблемы.** Бесперебойное снабжение потребителей электрической энергией, во многом определяется эксплуатационной надежностью электроэнергетического оборудования. Анализ эксплуатационной надежности высоковольтного оборудования показал, что высоковольтные вводы являются одним из наиболее повреждаемых узлов силовых трансформаторов [1–8]. При этом данная тенденция характерна не только для энергетической отрасли Украины [1–3], но и для большинства зарубежных стран [4–8]. Повреждение высоковольтных маслонаполненных вво-

дов являлись причиной многих аварий, как силовых трансформаторов, так и масляных выключателей и шунтирующих реакторов, что приводит к значительному экономическому ущербу [4, 5]. В связи с этим усовершенствование методов контроля состояния изоляции высоковольтных маслонаполненных вводов, является актуальной и практически значимой задачей.

**Анализ основных достижений и литературы.** В настоящее время оценка состояния изоляции высоковольтных вводов выполняется как по результатам пе-

периодического, так и непрерывного контроля. При периодических испытаниях значения показателей изоляции вводов измеряются на низком напряжении (до 10 кВ), после чего полученные значения сравниваются с предельно допустимыми значениями, которые регламентированы в действующих стандартах, например в [9–11] или с результатами предыдущих испытаний. Очевидно, что периодические измерения на низком напряжении не всегда позволяют своевременно выявить повреждение изоляции. Особенно это касается быстроразвивающихся дефектов. В связи с этим вопросам усовершенствования методов контроля состояния изоляции, посвящено достаточно большое число публикаций. Например, в работе [12] приводятся результаты анализа влияния влаги и продуктов старения изоляции на значения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости основной изоляции вводов. В работе [13] анализируется возникновение частичных разрядов в изоляции вводов, в частности приведено распределение электрического поля по обкладкам вводов. В [14] установлено, что для раннего обнаружения увлажнения необходимо выполнять измерения показателей на частоте 1 МГц и 10 кГц. Отмечены преимущества использования высокочастотных методов измерения показателей по сравнению с измерениями на частоте 50 Гц. Обобщая приведенные результаты можно констатировать, что в основном усовершенствование методов контроля состояния изоляции высоковольтных вводов направлены на усовершенствование методов измерения значений показателей, в тоже время вопросы усовершенствования методов принятия решений при проведении периодического контроля практически не рассматриваются. Одним из возможных направлений усовершенствования процедуры принятия решения при оценке состояния изоляции высоковольтного оборудования является анализ динамики изменения показателей изоляции оборудования во времени. Например, в [15–16] для оценки степени окисления трансформаторных масел предложено использовать модели множественной регрессии. В [17] для оценки состояния изоляции использован метод траекторий. А в работах [18–19] предложен метод раннего обнаружения развивающихся дефектов в маслонаполненном оборудовании по результатам анализа растворенных в масле газов, который основан на анализе динамики изменения концентраций газов во времени. Однако, практическая реализация того или иного метода принципиально невозможна без анализа зависимостей показателей изоляции от длительности эксплуатации во вводах с разным состоянием, что и послужило причиной выполнения данных исследований.

**Цель работы.** Целью данной статьи является анализ зависимостей показателей изоляции от продолжительности эксплуатации для исправных и не исправных высоковольтных маслонаполненных вводов.

**Методы исследования.** В качестве исходных данных анализировались результаты периодических

испытаний состояния изоляции по 68 исправным высоковольтным вводам герметичной конструкции и по 19 исправным высоковольтным вводам негерметичной конструкции. Для сравнения характера зависимостей показателей изоляции во вводах с разным состоянием также анализировались результаты периодического контроля для 9 высоковольтных вводов, которые были отбракованы по результатам периодических испытаний. Данные вводы были отбракованы из-за превышения предельно допустимых значений показателями изоляции, в основном тангенса угла диэлектрических потерь изоляции измерительного конденсатора ( $\text{tg}\delta_2$ ). Основными причинами превышения предельно допустимых значений являлись окисление и увлажнение трансформаторного масла, и старение изоляции.

В качестве показателей, характеризующих состояния изоляции высоковольтных маслонаполненных вводов, анализировались значения:

- тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции ( $\text{tg}\delta_1$ );
- емкости основной изоляции ( $C_1$ );
- тангенса угла диэлектрических потерь изоляции измерительного конденсатора ( $\text{tg}\delta_2$ );
- емкости измерительного конденсатора ( $C_2$ );
- сопротивление изоляции вывода для измерения ( $R$ ).

Результаты периодических испытаний состояния изоляции высоковольтных вводов были представлены в виде временных рядов: значения показателя на длительность эксплуатации. На первом этапе исследований выполнялась оценка статистической однородности временных рядов показателей, для этого была использована математическая модель дисперсионного анализа линейных моделей (ковариационного анализа) [20]. Допустим, что временные ряды показателей описываются линейной регрессией, при этом характеристики регрессии меняются от группы к группе. Тогда соответствующая модель имеет вид:

$$Y_{ji} = \alpha_j + \beta_j \cdot t_{ji} + Z_{ji}, \quad (1)$$

где  $i$  – номер измерения ( $i = \overline{1, n_j}$ ) для  $j$ -го показателя;  $t_{ji}$  – время  $i$ -го измерения значений  $j$ -го показателя;  $\alpha_j$ ,  $\beta_j$  – частные коэффициенты регрессии для значений  $j$ -й группы результатов измерения;  $Z_{ji}$  – случайный неконтролируемый остаток, для которого  $M[Z_{ji}] = 0$  и  $M[Z_{ji}^2] = \sigma_z^2$ . Кроме этого, остатки  $Z_{ji}$  взаимно независимы.

Если  $A_j$ ,  $B_j$  получены с помощью метода наименьших квадратов и являются оценками неизвестных коэффициентов  $\alpha_j$  и  $\beta_j$ , то будет естественным рассмотреть может ли одно линейное уравнение

$$y = a + b \cdot x \quad (2)$$

представить все  $k$  регрессий (1).

Такая линейная  $2(k-1)$  гипотеза  $H_0$ : ( $a_1=a_2=\dots=a_k=a$ ;  $b_1=b_2=\dots=b_k=b$ ) соответствует выводу об одинаковой скорости дрейфа значений показателей

изоляции вводов на всем наблюдаемом интервале эксплуатации, что идентично полной однородности временных рядов показателей. Эту гипотезу удобно разбить на четыре части каждую, из которых можно проверить в отдельности.

$H_0^{(1)}$ : линии регрессии параллельны, т.е.  $(b_1=b_2=\dots=b_k)$ ;

$H_0^{(2)}$ : групповые средние лежат на прямой;

$H_0^{(3)}$ : угловой коэффициент этой прямой равен  $b_c$ , т.е. совпадает с  $(b_1, b_2, b_k)$ ;

$H_0^{(4)}$ : групповые свободные члены совпадают, т.е.  $(a_1=a_2=\dots=a_k)$ .

Для проверки данных гипотез найдем разложение полной суммы квадратов отклонений величин  $Y_{ij}$  от общего среднего. Такое разложение имеет вид [20]:

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ji} - \bar{y})^2 = w_0 \cdot B_0^2 + \frac{w_c \cdot w_m}{w_0} (B_c - B_m)^2 + \sum_{j=1}^k n_j [\bar{y}_j - \bar{y} - B_m \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})]^2 + \sum_{j=1}^k w_j \cdot (B_j - B_c)^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [y_{ji} - \bar{y}_j - B_j \cdot (x_{ji} - \bar{x}_j)]^2. \quad (3)$$

Результаты дисперсионного анализа для разложения (3) представлены в табл. 1.

Значение параметров  $a_m$  и  $b_m$  определяются уравнениями:

$$a_m = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^k n_j \cdot a_j;$$

$$b_m = \frac{1}{w_m} \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x}) \cdot (a_j + b_j \cdot \bar{x}_j).$$

Учитывая результаты табл. 1, рассмотрим три дополнительные статистики:

$$S_{\Sigma 0} = S_{WG} + S_G + S_W; S_a = S_G + S_{WG}; S_{Ra} = S_W + S_R.$$

Эти статистики связаны со следующими значениями степеней свободы:

$$\nu_{\Sigma 0} = \nu_{WG} + \nu_G + \nu_W; \nu_a = \nu_{WG} + \nu_G; \nu_{Ra} = \nu_W + \nu_R.$$

Для проверки выдвинутых гипотез выполним расчет средних квадратов, которые определяются как:

$$\bar{S}_0 = \frac{S_0}{\nu_0}; \bar{S}_{WG} = \frac{S_{WG}}{\nu_{WG}}; \bar{S}_G = \frac{S_G}{\nu_G}; \bar{S}_W = \frac{S_W}{\nu_W};$$

$$\bar{S}_a = \frac{S_a}{\nu_a}; \bar{S}_{Ra} = \frac{S_{Ra}}{\nu_{Ra}}; \bar{S}_R = \frac{S_R}{\nu_R}.$$

Полученные значения средних квадратов при известных значениях числа степеней свободы позволили рассчитать значения  $F$ -статистик:

$$F_0 = \frac{\bar{S}_0}{\bar{S}_R}; F_{WG} = \frac{\bar{S}_{WG}}{\bar{S}_R}; F_G = \frac{\bar{S}_G}{\bar{S}_R}; F_W = \frac{\bar{S}_W}{\bar{S}_R}; F_a = \frac{\bar{S}_a}{\bar{S}_{Ra}}.$$

Проверка гипотезы  $H_0^{(1)}$  осуществлялась путем сравнения значения статистики  $F_W$  с  $F$ -распределением

с  $k-1$  и  $N-2k$  степенями свободы. Гипотеза  $H_0^{(2)}$  проверялась путем сравнения статистики  $F_G$  с  $F$ -распределением с  $k-2$  и  $N-2k$  степенями свободы, а гипотеза  $H_0^{(3)}$  – путем сравнения статистики  $F_{WG}$  с  $F$ -распределением с 1 и  $N-2k$  степенями свободы. Проверка гипотезы выполнялась  $H_0^{(4)}$  путем сравнения статистики  $F_a$  с  $F$ -распределением с  $k-1$  и  $N-k-1$  степенями свободы. Для оценки суммарных изменений в параметрах  $a_i$  и  $b_i$  модели используем тестовую статистику  $F_{\Sigma 0}$ :

$$F_{\Sigma 0} = \frac{\bar{S}_G + \bar{S}_{WG} + \bar{S}_W}{2 \cdot \bar{S}_R} \cdot \left( \frac{N-2 \cdot k}{k-1} \right).$$

Таблица 1 – Результаты ковариационного анализа

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов отклонений
Общий угловой коэффициент регрессии	$\nu_0 = 1$	$S_0 = w_0 B_0^2$
Угловой коэффициент групповых средних по сравнению со средневзвешен. коэффициентом	$\nu_{WG} = 1$	$S_{WG} = \frac{w_c \cdot w_m}{w_0} \cdot (B_c - B_m)^2$
Относительно линейной регрессии групповых средних	$\nu_G = k - 2$	$S_G = \sum_{j=1}^k n_j \cdot [\bar{y}_j - \bar{y} - B_m \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})]^2$
Между угловыми коэффициентами внутри групп	$\nu_W = k - 1$	$S_W = \sum_{j=1}^k w_j (B_j - B_c)^2$
Остаток	$\nu_R = N - 2k$	$S_R = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [y_{ji} - \bar{y}_j - B_j (x_{ji} - \bar{x}_j)]^2$
Общий	$\nu = N - 1$	$S = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ji} - \bar{y})^2$

Систематическое изменение математического ожидания любого из показателей контроля под влиянием времени эксплуатации  $Y$  можно оценить с помощью тестовой статистики  $F_0$ . Полное дисперсионное разложение выполнялось с помощью программы «KOVAN», разработанной на кафедре «Передача электрической энергии» НТУ «ХПИ» [21]. Результаты анализа для исправных высоковольтных вводов герметичного исполнения приведены в табл. 2, для исправных высоковольтных вводов негерметичного исполнения в табл. 3, а для герметичных вводов, в которых были выявлены неисправности в табл. 4.

В данных таблицах приведены значения сумм дисперсионного разложения, числа степеней свободы и значения критериев  $F_0, F_a, F_w, F_{\Sigma 0}$ , а также критериев  $F_{WG}$  и  $F_G$ , которые можно использовать для оценки равномерности рассеяния аддитивных отклонений относительно среднего значения свободного члена линейной регрессии:  $M[\alpha_t] = \bar{Y} - B_0 \cdot \bar{T}$ .

Таблица 2 – Результаты дисперсионного разложения для показателей изоляции исправных высоковольтных вводов герметичной конструкции напряжением 110 кВ

Результаты разложения	Показатель				
	$\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2$	$C_1$	$C_2$	$R$
Объем выборки	453	453	453	453	453
Число рядов	68	68	68	68	68
Значения сумм дисперсионного разложения					
$S$	47,505	82,426	8273962,304	12690061,229	1829253642,384
$S_0$	0,369	3,545	1991403,916	1102157,096	427283328,995
$S_{WG}$	0,222	2,812	1065379,407	477434,953	8736739,378
$S_G$	21,577	29,336	306977,5348	7184996,707	764782740,280
$S_w$	7,565	11,505	910831,2308	1890796,332	205838816,950
$S_R$	17,772	35,228	2999370,216	2034676,141	412612016,781
$S_\alpha$	21,799	32,148	2372356,942	7662431,660	783519479,658
$S_{R\alpha}$	25,338	46,733	3910201,447	3925472,473	618450833,731
$S_{\Sigma 0}$	29,364	43,653	3283188,173	9553227,992	989358296,608
Число степеней свободы					
$\nu_0$	1	1	1	1	1
$\nu_{WG}$	1	1	1	1	1
$\nu_G$	66	66	66	66	66
$\nu_w$	67	67	67	67	67
$\nu_R$	317	317	317	317	317
$\nu_\alpha$	67	67	67	67	67
$\nu_{R\alpha}$	384	384	384	384	384
Значения $F$ -критерия (наблюдаемое /табличное при $p=0,95$ )					
$F_0$	6,580/3,841	31,897/3,841	210,469/3,841	171,714/3,841	328,271/3,841
$F_{WG}$	3,961/3,841	25,306/3,841	112,598/3,841	74,383/3,841	14,394/3,841
$F_G$	5,831/1,308	3,999/1,308	2,092/1,308	16,960/1,308	8,902/1,308
$F_w$	2,013/1,306	1,306/1,306	1,436/1,306	4,396/1,306	2,360/1,306
$F_\alpha$	4,930/1,306	3,942/1,306	3,477/1,306	11,187/1,306	7,261/1,306
$F_{\Sigma 0}$	3,908/1,373	2,931/1,373	2,589/1,373	11,107/1,373	5,672/1,373

Сравнивая результаты из табл. 2–4, легко увидеть, что характер зависимостей показателей от длительности эксплуатации для высоковольтных вводов с разным состоянием существенно отличается. Как видно из табл. 2–3 для показателей исправных высоковольтных вводов, как герметичной, так и негерметичной конструкции расчетные значения критериев  $F_w$  превышают критические значения  $F$ -критерия с учетом числа степеней свободы, а, следовательно, гипотеза  $H_0^{(1)}$  отвергается. Исключение составляют показатели  $\text{tg}\delta_2$  и  $R$  для вводов негерметичной конструкции (см. табл. 3). Для большинства показателей линии регрессии не параллельны, что свидетельствует о том, что старение изоляции во вводах протекает с разной скоростью, т.е. имеет место наличие мультипликативного смещения между отдельными временными рядами показателей, которое обусловлено различными значениями токов нагрузки, продолжительностью эксплуатации и других факторов [22]. В тоже время, практически для всех показателей неисправных высоковольтных вводов, за исключением емкости основной изоляции  $C_1$  (см. табл. 4), гипотеза  $H_0^{(1)}$  не отвергается.

Для всех показателей исправных высоковольтных вводов герметичной конструкции расчетные значения критерия  $F_G$ , превышают критические значения  $F$ -критерия с  $k-2$  и  $N-2k$  степенями свободы. Т.е. для показателей исправных высоковольтных вводов герметичной конструкции, гипотеза о том, что групповые средние лежат на прямой  $H_0^{(2)}$  была отвергнута. Для исправных негерметичных вводов (см. табл. 3) гипотеза о том, что групповые средние лежат на прямой

$H_0^{(2)}$  была отвергнута для всех показателей за исключением емкости  $C_1$ . В тоже время для отбракованных вводов (см. табл. 4), для всех показателей, кроме емкости  $C_1$ , гипотеза  $H_0^{(2)}$  не отвергается. Данное обстоятельство может быть объяснено ограниченным объемом анализируемой выборки для неисправных вводов. Для исправных высоковольтных вводов герметичной конструкции, гипотеза  $H_0^{(3)}$  о том, что угловой коэффициент линейной регрессии построенной по всей совокупности исходных данных равен частным угловым коэффициентам отдельных временных рядов показателей отвергается, поскольку расчетные значения критерия  $F_{WG}$  превышают критические значения  $F$  – критерия, при числе степеней свободы 1 и  $N-2k$ . Это свидетельствует о том, что процессы старения а, следовательно, и интенсивность изменения показателей изоляции исправных вводов, протекают с разной скоростью.

Для исправных вводов негерметичной конструкции (см. табл. 3) гипотеза  $H_0^{(3)}$  также была отвергнута для всех показателей изоляции, кроме емкости  $C_1$ . Для неисправных вводов (см. табл. 4), гипотеза  $H_0^{(3)}$  не отвергается только для временных рядов  $\text{tg}\delta_2$  изоляции измерительного конденсатора. Для временных рядов остальных показателей гипотеза  $H_0^{(3)}$  была отвергнута. Последний вывод является принципиально важным, поскольку он показывает, что в зависимости от характера повреждения, значения показателей изоляции вводов, могут изменяться разным образом. Гипотеза  $H_0^{(4)}$  о том, что групповые свободные члены

совпадают, была отвергнута для всех показателей исправных вводов герметичной конструкции (см. табл. 2). Из табл. 2 следует, что для всех без исключения показателей критерии  $F_w$  и  $F_\alpha$  связаны неравенством  $F_w < F_\alpha$ , что указывает, на систематические расхождения в исходных значениях показателей, полученных перед началом эксплуатации вводов. Кроме того, большие значения критерия  $F_G$  говорят о неравномерности разброса начальных значений показателей, что свидетельствует о существенных расхождениях в значениях показателей изоляции вводов в зависимости от завода-изготовителя. Такая же тенденция имеет место и для исправных негерметичных вводов, кроме емкости  $C_1$ . Для вводов с повреждениями (см. табл. 4) наиболее существенные различия в исходных значениях показателей выявлены для показателей  $C_1$ ,  $C_2$  и  $R$ . Для временных рядов данных показателей гипотеза  $H_0^{(4)}$  была отвергнута. А вот для временных рядов  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$  оснований для того, чтобы гипотеза  $H_0^{(4)}$  была отвергнута, не выявлено. Выполненный анализ значений критерия  $F_{\Sigma 0}$  выявил значимое влия-

ние суммарных изменений в параметрах  $a_i$  и  $b_i$  модели для всех без исключения показателей изоляции исправных вводов герметичного исполнения и для всех показателей, кроме  $C_1$  для исправных вводов негерметичного исполнения. В тоже время для неисправных вводов, такое влияние имеет место только для показателей, для которых свободные члены не совпадают ( $C_1$ ,  $C_2$  и  $R$ ), что вполне очевидно и не противоречит полученным ранее результатам. Что же касается систематических изменений математического ожидания показателей, то как видно из табл. 2, значения критерия  $F_0$ , для исправных вводов герметичного исполнения, превышают критические значения, что свидетельствует о значимом изменении средних значений показателей со временем эксплуатации, т.е. о наличии процессов старения изоляции вводов. Для исправных вводов негерметичного исполнения (см. табл. 3) значимое изменение средних значений выявлено для всех показателей кроме  $C_1$  и  $R$ , для неисправных вводов (см. табл. 4) также для всех показателей.

Таблица 3 – Результаты дисперсионного разложения для показателей изоляции исправных высоковольтных вводов негерметичной конструкции напряжением 110 кВ

Результаты разложения	Показатель				
	$\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2$	$C_1$	$C_2$	$R$
Объем выборки	140	140	140	140	140
Число рядов	19	19	19	19	19
Значения сумм дисперсионного разложения					
$S$	74,885	44,541	6791737,727	7135444,921	954601714,286
$S_0$	0,596	1,709	3098,457	296823,287	5509330,092
$S_{WG}$	12,259	3,679	116987,796	138682,558	44335403,011
$S_G$	45,736	21,964	972274,463	3942059,551	564354160,642
$S_w$	4,043	2,390	1556803,169	966865,633	39202941,026
$S_R$	12,251	14,798	4142573,842	1791013,892	301199879,514
$S_\alpha$	57,996	25,643	1089262,259	4080742,109	608689563,653
$S_{R\alpha}$	16,294	17,189	5699377,011	2757879,525	340402820,540
$S_{\Sigma 0}$	62,038	28,034	2646065,428	5047607,742	647892504,679
Число степеней свободы					
$v_0$	1	1	1	1	1
$v_{WG}$	1	1	1	1	1
$v_G$	17	17	17	17	17
$v_w$	18	18	18	18	18
$v_R$	102	102	102	102	102
$v_\alpha$	18	18	18	18	18
$v_{R\alpha}$	120	120	120	120	120
Значения $F$ -критерия (наблюдаемое/табличное при $p=0,95$ )					
$F_0$	4,958/3,944	11,776/3,944	0,0762/3,944	16,904/3,944	1,865/3,944
$F_{WG}$	102,1/3,944	25,358/3,944	2,880/3,944	7,898/3,944	15,01/3,944
$F_G$	22,399/1,74	8,905/1,74	1,408/1,74	13,206/1,74	11,242/1,74
$F_w$	1,869/1,721	0,915/1,721	2,129/1,721	3,059/1,721	0,737/1,721
$F_\alpha$	23,72/1,695	9,945/1,695	1,274/1,695	9,864/1,695	11,92/1,695
$F_{\Sigma 0}$	14,34/1,982	5,367/1,982	1,809/1,982	7,985/1,982	6,094/1,982

Более точную информацию о характере зависимостей показателей изоляции от продолжительности эксплуатации для высоковольтных вводов с разным состоянием, можно получить, проанализировав зависимости для отдельных вводов. Для этого математическая модель состояния объекта контроля может быть представлена в виде многомерного вектора показателей (характеристик) [23]:

$$\bar{x}(t) = \bar{G}(t) + \bar{\eta}(t) + \bar{\xi}(t), \quad (4)$$

где  $\bar{G}(t)$  – постоянная составляющая, характеризующая в объекте необратимые изменения;  $\bar{\eta}(t)$  – обратимые изменения;  $\bar{\xi}(t)$  – погрешность измерительных средств контроля.

Таблица 4 – Результаты дисперсионного разложения для показателей изоляции неисправных высоковольтных вводов, напряжением 110 кВ

Результаты разложения	Показатель				
	$\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2$	$C_1$	$C_2$	$R$
Объем выборки	60	60	60	60	60
Число рядов	9	9	9	9	9
Значения сумм дисперсионного разложения					
$S$	2,057	21,961	825092,290	1105263,170	692036093,333
$S_0$	0,158	2,857	155702,341	58195,516	172862580,239
$S_{WG}$	0,144	0,003	215021,228	402902,058	278678246,546
$S_G$	0,383	2,791	446158,808	352560,342	44408676,903
$S_w$	0,275	4,448	3605,246	32136,763	13032577,067
$S_R$	1,096	11,863	4604,667	259468,489	183054012,578
$S_\alpha$	0,528	2,794	661180,036	755462,401	323086923,449
$S_{R\alpha}$	1,372	16,311	8209,913	291605,253	196086589,645
$S_{\Sigma 0}$	0,803	7,241	64785,282	787599,164	336119500,517
Число степеней свободы					
$\nu_0$	1	1	1	1	1
$\nu_{WG}$	1	1	1	1	1
$\nu_G$	7	7	7	7	7
$\nu_w$	8	8	8	8	8
$\nu_R$	42	42	42	42	42
$\nu_\alpha$	8	8	8	8	8
$\nu_{R\alpha}$	50	50	50	50	50
Значения $F$ -критерия (наблюдаемое /табличное при $p=0,95$ )					
$F_0$	6,036/4,076	10,114/4,076	1420,189/4,076	9,420/4,076	39,661/4,076
$F_{WG}$	5,532/4,076	0,0106/4,076	1961,247/4,076	65,217/4,076	63,94/4,076
$F_G$	2,097/2,24	1,411/2,24	581,356/2,24	8,152/2,24	1,455/2,24
$F_w$	1,319/2,171	1,968/2,171	4,110/2,171	0,650/2,171	0,373/2,171
$F_\alpha$	2,403/2,138	1,070/2,138	503,339/2,138	16,191/2,138	10,297/2,138
$F_{\Sigma 0}$	1,922/3,039	1,602/3,039	378,976/3,039	7,968/3,039	4,819/3,039

Считается, что регулярная составляющая представляет собой гладкую функцию от аргумента времени  $t$ , описываемую конечным вектором параметров  $\beta$ .  $\bar{G}(t) = f(\bar{\beta}, t)$ . Используя терминологию статистического анализа временных рядов [23], регулярную составляющую назовем трендом. Случайная составляющая  $\bar{\eta}(t)$  – это случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и с достаточно узкой автокорреляционной функцией. Составляющие  $\bar{\eta}(t)$  и  $\xi(t)$  определяют стохастическую часть процесса. Для простоты анализа составляющие  $\bar{\eta}(t)$  и  $\xi(t)$  можно объединить в процесс (4) и записать в виде:

$$\bar{x}(t) = \bar{G}(t) + \bar{\eta}(t). \quad (5)$$

Процессом постепенного изменения технического состояния объекта контроля будем считать процесс, для которого выполняется соотношение:

$$\|G(t+t) - G(t)\| \gg \|\eta(t+t) - \eta(t)\|, \quad (6)$$

где  $\|\dots\|$  – норма вектора.

Действительно, чем сильнее неравенство (6), тем ближе процесс к детерминированному, функционально зависящему от времени эксплуатации  $t$ . При этом случайный процесс предполагается стационарным по среднему значению, т.е.:

$$M[\eta(t)] = 0. \quad (7)$$

Если выполняется условие (7) для процесса (5), то он может считаться детерминированным и его можно использовать для прогнозирования технического состояния объекта (например, для оценки остаточного ресурса или параметрического отказа). В таком случае многомерный процесс необратимого изменения технического состояния объекта контроля определяется вектором  $W[\beta(x), t]$  функции времени, постоянных коэффициентов  $\beta$ :

$$\bar{x}(t) = \bar{W}[\bar{\beta}(x), t] + \bar{E}, \quad (8)$$

где  $\bar{E}$  – вектор случайных ошибок, не зависящих от времени эксплуатации.

При больших значениях дисперсий случайных ошибок можно использовать операции сглаживания, практически сводящиеся к минимизации суммы квадратов отклонений (метод наименьших квадратов):

$$\sum_{i=1}^n \{x_j(t_i) - \bar{W}[\bar{\beta}(x), t_i]\}^2 = \min, \quad (9)$$

где  $x(t_i)$  – одномерный временной ряд для  $j$ -й составляющей вектора  $X(t)$ .

Выражение (8) позволяет рассматривать изменения в ходе периодических испытаний значения показателей  $X_i$  как реализации нестационарных по среднему и непрерывных случайных процессов с дискретным временем (временем профилактических испытаний). Под значимостью контролируемого показателя качества будем понимать его способность ощу-

тимо изменять регулярную составляющую  $W[\beta(x), t]$  на фоне случайной величины  $e_i$ , что предполагает превышение изменения тренда  $f(\beta, t)$  над средним квадратическим отклонением процесса  $\sigma^2$  в интервале времени эксплуатации оборудования.

Определение вида функций  $\bar{W}[\bar{\beta}(x), t_i]$  и оценка коэффициентов  $\beta_k(x)$ ,  $k = \overline{1, P}$ , должна производиться по априорно известной обучающей выборке, т.е. фактически по результатам подконтрольной эксплуатации объекта (по результатам профилактических испытаний). При этом для снижения ошибок первого и второго рода имеет смысл уменьшить дисперсию случайной величины  $e_i$  путем исключения из массива исходных данных заведомо искаженных выборочных последовательностей. Превышение случайной величины  $e_i$  над регулярной составляющей  $W[\beta(x), t]$  может привести к тому, что на анализируемом промежутке времени процесс окажется стационарным по математическому ожиданию, либо при наличии наиболее грубых ошибок изменит направление.

Для проверки условия (7) использовался параметрический тест на значимость линейной регрессии показателя качества по времени эксплуатации. Такой тест эквивалентен однофакторного дисперсному анализу показателя качества на наличие систематического смещения среднего значения на различных интервалах времени эксплуатации [24, 25]. Тестирование временных рядов как непрерывных случайных процессов с дискретным временем проводилось при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и основной гипотезе  $H_0$  – числовые характеристики ряда инвариантны во времени. Проверка основной гипотезы  $H_0$  для всех временных рядов показателей проводилась в следующей последовательности.

Рассматривалась статистическая модель:

$$Y_i = b_0 + b_1 \cdot x_i + \varepsilon_i. \quad (10)$$

Остатки распределены по нормальному закону:  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$  с  $M[\varepsilon_i] = 0$ ;  $D[\varepsilon_i] = \sigma^2$ ;  $\text{cov}[\varepsilon_i] = 0$ ,  $i = 1, n$ .

Коэффициенты линейной регрессии определялись с помощью метода наименьших квадратов:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 - \sum_{i=1}^n Y_i \cdot t_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2}; \quad (11)$$

$$b_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n Y_i \cdot t_i - \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2}, \quad (12)$$

где:  $Y_i$  – текущее значение показателя;  $t_i$  – текущее значение времени эксплуатации;  $n$  – объем выборочных значений.

После чего рассчитывалось значение величины  $R^2$ , которая представляет собой отношение полезного сигнала (сумма квадратов отклонений, обусловленная

регрессией, т.е. фактически угловым коэффициентом  $b_1$ ) к шуму (сумма квадратов отклонений относительно регрессии), по выражению:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2},$$

где:  $\hat{Y}_i$  – текущее значение показателя, рассчитанное по (10) с учетом значений коэффициентов  $b_1$  и  $b_0$ ;  $\bar{Y}$  – математическое ожидание показателя.

Вычислялась критериальная статистика  $F_{1, (n_i-2)}$ , как функция оценки  $R^2$ :

$$F_{1, (n_i-2)} = \frac{R^2}{(1-R^2)} (n_i-2). \quad (13)$$

3. Рассчитанное значение критерия Фишера сравнивалось с 95% точкой  $F$ –распределения с 1 и  $(n_i-2)$  степенями свободы.

4. Решение: основная гипотеза  $H_0$  ( $b_1=0$ ) отвергалась, если  $F_{1, (n_i-2)} > F_{кр}$

Полное дисперсионное разложение выполнялось с помощью программы «REGRA», [21]. Результаты регрессионного анализа для показателей изоляции исправных вводов герметичного исполнения приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты регрессионного анализа для показателей изоляции исправных высоковольтных вводов герметичной конструкции, напряжением 110 кВ

Показатель	N	n	Стационарные временные ряды ( $F_{рас} < F_{кр}$ )						Не стационарные временные ряды ( $F_{рас} > F_{кр}$ )					
			$b_1 < 0$		$b_1 > 0$		$b_1 = 0$		$b_1 < 0$		$b_1 > 0$			
			N	n	N	n	N	n	N	n	N	n	N	n
$\text{tg}\delta_1$	453	68	204	28	223	36	5	1	0	0	21	3		
$\text{tg}\delta_2$	453	68	200	34	229	31	0	0	24	3	0	0		
$C_1$	453	68	171	33	157	25	0	0	73	7	52	3		
$C_2$	453	68	136	22	184	32	0	0	54	7	79	7		
R	453	68	25	4	29	5	285	51	114	8	0	0		

N – количество измерений; n – количество временных рядов.

Как видно из табл. 5, в исправных высоковольтных вводах герметичной конструкции случайная составляющая превышает систематическую составляющую практически для всех показателей. Из 68 анализируемых рядов значение  $F$ –критерия превышает критические значения только для 3-х рядов  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$  (при этом для  $\text{tg}\delta_2$  значения показателя значимо снижаются с ростом продолжительности эксплуатации), 10 рядов для  $C_1$  (для 7 рядов значение  $C_1$  снижается с ростом продолжительности эксплуатации) и 14 рядов  $C_2$  (для 7 рядов значение  $C_2$  снижается с ростом продолжительности эксплуатации). Из 68 рядов значимое снижение сопротивления измерительного вывода выявлено только для 8 вводов. Для всех остальных временных рядов показателей значение  $F$ –критерия не превышает критические значения. Более того, как

видно из табл. 5, почти для 50% всех стационарных зависимостей, значения показателей незначительно уменьшаются с течением времени. В 51 вводе из 68 вводов значение сопротивления изоляции  $R$  вообще не изменялось с течением времени ( $b_1=0$ ). Обобщая полученные результаты можно сделать вывод, что для показателей состояния исправных вводов герметичного исполнения, случайная, стохастическая составляющая процесса, значимо превышает систематическую составляющую.

Результаты регрессионного анализа для показателей изоляции исправных высоковольтных вводов негерметичной конструкции приведены в табл. 6. Как видно из табл. 6, из 19 анализируемых вводов значимый рост значений  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$  выявлен только в трех вводах. Для всех остальных вводов зависимости  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$  от длительности эксплуатации являются стационарными, при этом наблюдается незначимое снижение значений  $\text{tg}\delta_1$  в 9 высоковольтных вводах, а  $\text{tg}\delta_2$  в 6 вводах. Из 19 исправных негерметичных вводов значимого изменения значений емкости основной изоляции и сопротивления измерительного вывода не выявлено ни в одном, что подтверждает результаты ковариационного анализа. При этом в 11 из 19 вводов значения  $R$  вообще не менялись на всем интервале наблюдений. Значимые изменения значений емкости  $C_2$  выявлены в 7 вводах из 19, при этом в 4 вводах значения  $C_2$  значимо снижаются с ростом длительности эксплуатации, а в 3 вводах значимо растут.

Результаты регрессионного анализа полученные для отбракованных высоковольтных вводов, приведены в табл. 7.

Таблица 6 – Результаты регрессионного анализа для показателей изоляции исправных высоковольтных вводов негерметичной конструкции напряжением 110 кВ

Показатель	N	n	Стационарные временные ряды ( $F_{\text{рас}} < F_{\text{кр}}$ )						Нестационарные временные ряды ( $F_{\text{рас}} > F_{\text{кр}}$ )			
			$b_1 < 0$		$b_1 > 0$		$b_1 = 0$		$b_1 < 0$		$b_1 > 0$	
			N	n	N	n	N	n	N	n	N	n
$\text{tg}\delta_1$	140	19	49	8	49	7	0	0	6	1	36	3
$\text{tg}\delta_2$	140	19	35	5	75	11	0	0	0	0	30	3
$C_1$	140	19	51	7	89	12	0	0	0	0	0	0
$C_2$	140	19	39	6	38	6	0	0	35	4	28	3
$R$	140	19	52	6	22	2	56	11	0	0	0	0

N – количество измерений; n – количество временных рядов.

Таблица 7 – Результаты регрессионного анализа для показателей изоляции отбракованных высоковольтных вводов, напряжением 110 кВ

Показатель	N	n	Стационарные временные ряды ( $F_{\text{рас}} < F_{\text{кр}}$ )						Не стационарные временные ряды ( $F_{\text{рас}} > F_{\text{кр}}$ )			
			$b_1 < 0$		$b_1 > 0$		$b_1 = 0$		$b_1 < 0$		$b_1 > 0$	
			N	n	N	n	N	n	N	n	N	n
$\text{tg}\delta_1$	60	9	23	3	9	1	0	0	0	0	28	5
$\text{tg}\delta_2$	60	9	0	0	9	1	0	0	0	0	51	8
$C_1$	60	9	22	3	14	2	0	0	14	2	10	2
$C_2$	60	9	0	0	12	2	0	0	48	7	0	0
$R$	60	9	22	3	5	1	15	3	9	1	9	1

N – количество измерений; n – количество временных рядов.

Как видно из табл. 7, развитие дефекта в изоляции высоковольтных вводов приводит к появлению во временных зависимостях показателей значимой систематической составляющей.

При этом в отличие от исправных вводов, в каждом дефектном вводе выявлена значимая систематическая составляющая как минимум для одного показателя. Таким образом, еще одним признаком наличия дефекта изоляции высоковольтных вводов является появление значимой систематической составляющей в зависимостях показателей от продолжительности эксплуатации.

Сравнивая между собой результаты ковариационного и регрессионного анализа для исправных трансформаторов как герметичной, так и негерметичной конструкции легко увидеть, что для объединенного массива данных изменение большинства показателей во времени являются значимыми. В тоже время общее число отдельных временных рядов показателей, для которых выявлено значимое изменение во времени, крайне мало. Таким образом, наличие даже относительно небольшого количества временных рядов показателей, которые значимо изменяются во времени, в объединенном массиве данных, приводит к тому, что зависимость показателей от длительности эксплуатации в объединенном массиве приобретает нестационарный характер. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены зависимости емкости  $C_2$  от длительности эксплуатации для объединенного массива данных (рис. 1 а) и для показателей, для которых выявлены значимые зависимости от продолжительности эксплуатации (рис. 1, б). Сравнивая зависимости, приведенные на рис. 1, а и рис. 1, б, легко увидеть, что временные ряды, для которых выявлено значимое изменение во времени, имеют большее количество измерений и получены для более продолжительных интервалов эксплуатации, по сравнению с остальными результатами. Как видно из табл. 7, развитие дефекта в изоляции высоковольтных вводов приводит к появлению во временных зависимостях показателей значимой систематической составляющей. При этом в отличие от исправных вводов в каждом неисправном вводе выявлена значимая систематическая составляющая как минимум для одного показателя. Для подтверждения данного вывода рассмотрим динамику изменения показателей изоляции в высоковольтных вводах с разным состоянием. Поскольку для линейных моделей значение меры согласия  $R^2$  равно квадрату коэффициента парной корреляции [26], то для оценки динамики изменения показателей использовалось значение коэффициента парной корреляции:

$$r_B = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p}) \cdot (t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}}, \quad (14)$$

где  $r_B$  – выборочное значение коэффициента парной корреляции;  $p_i$  – текущее значение показателя;  $t_i$  – текущее значение времени эксплуатации;  $\bar{p}$  – среднее



значение показателя;  $\bar{t}$  – среднее значение времени эксплуатации;  $n$  – объем выборочных значений.

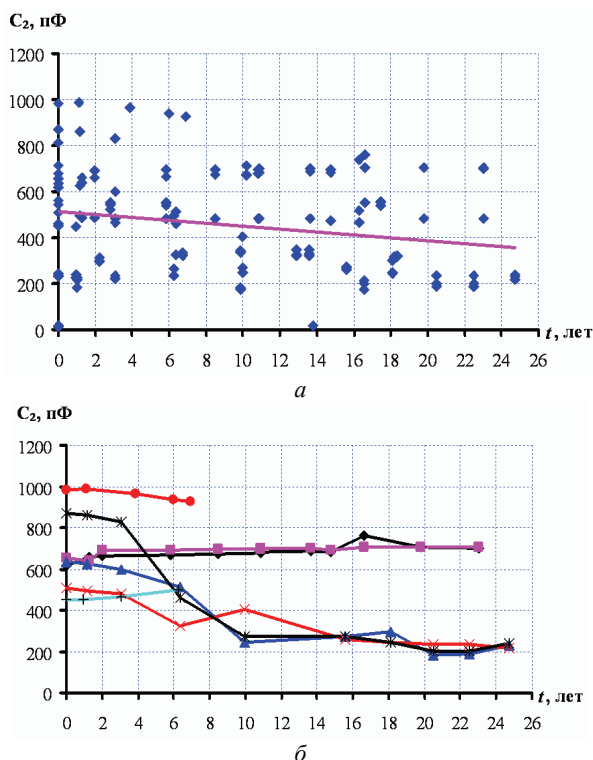


Рис. 1. Зависимости емкости наружных слоев изоляции ( $C_2$ ) от длительности эксплуатации для объединенного массива данных (а) и для показателей, для которых выявлены значимые зависимости от продолжительности эксплуатации (б)

Решение о наличии значимой корреляционной связи принималось, если расчетное выборочное значение коэффициента парной корреляции ( $r_b$ ) превышало критическое значение ( $r_{\text{крит.}}$ ) при числе степеней свободы  $n-2$  и доверительной вероятности  $p=0,95$  (для удобства анализа такие значения выделены жирным шрифтом). Такой подход позволяет не только оценить наличие связи между показателями и продолжительностью эксплуатации, но и оценить связь между отдельными показателями, а также между показателями во вводах на соседних фазах [18, 19].

Таблица 8 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции и длительностью эксплуатации и между отдельными показателями ввода ГМТА–110/630–У1 110 кВ

Показатель	Корреляция между показателями и длительностью эксплуатации	$\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2$	$C_1$	$C_2$	R
$n=9, r_{\text{крит. } 7, 0,95}=0,666$						
$\text{tg}\delta_1$	<b>0.693</b>	<b>1,00</b>	<b>0.875</b>	-0.456	-0.323	-0.396
$\text{tg}\delta_2$	<b>0.865</b>	<b>0.875</b>	<b>1,00</b>	-0.397	-0.294	-0.561
$C_1$	-0.601	-0.456	-0.397	<b>1,00</b>	<b>0.936</b>	0.085
$C_2$	-0.534	-0.323	-0.294	<b>0.936</b>	<b>1,00</b>	-0.057
R	-0.302	-0.396	-0.561	0.085	-0.057	<b>1,00</b>

Примечание:  $n$  – количество измерений

В табл. 8 приведены результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции и длительностью эксплуатации, а также между отдельными показателями ввода ГМТА–110/630–У1 110 кВ, установленного на фазе А трансформатора ТРДН–25/110. Данный ввод был отбракован по значениям  $\text{tg}\delta_2$  и 07.07.2017 года был выведен из эксплуатации. Как видно из табл.8, из пяти показателей значимая положительная связь с продолжительностью эксплуатации (наличие значимой систематической составляющей) выявлено только для  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$ . Значимая корреляционная связь имеет место только между  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$  и между емкостью  $C_1$  и емкостью  $C_2$ .

В табл. 9, приведены результаты корреляционного анализа между показателями изоляции неисправного ввода (фаза А) и исправных вводов установленных на фазах В и С. Предполагалось, что характер изменения показателей изоляции во времени, для неисправного высоковольтного ввода, должен существенно отличаться от характера изменения во времени показателей в исправных высоковольтных вводах. Т.е. значимая корреляционная связь между показателями изоляции для неисправного и исправных вводов должна отсутствовать.

Таблица 9 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей неисправного ввода ГМТА–110/630–У1 110 кВ (фаза А) и показателями исправных вводов, установленных на соседних фазах (В и С)

Фаза	$\text{tg}\delta_1/\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2/\text{tg}\delta_2$	$C_1/C_1$	$C_2/C_2$	R/R
$n=9, r_{\text{крит. } 7, 0,95}=0,666$					
А–В	-0,068	0,083	<b>0,845</b>	<b>1,000</b>	0,082
А–С	-0,192	0,064	0,427	<b>1,000</b>	0,202
В–С	<b>0,901</b>	<b>0,971</b>	0,255	<b>1,000</b>	0,373

Как видно из табл. 9, значимая корреляционная связь между значениями  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$  в исправных и неисправных вводах не выявлена, что свидетельствует о разном характере изменения данных показателей во вводах с разным состоянием. В тоже время, характер изменения во времени значений  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$  в исправных вводах (фазы В–С) совпадает, о чем свидетельствуют значения коэффициентов парной корреляции из табл. 9, а также зависимости данных показателей приведенных на рис. 2. (а). Следует отметить, что несмотря на неисправность ввода фазы А, выявлена значимая корреляционная связь между емкостью основной изоляции вводов на фазе А и фазе В. В тоже время значимая связь между емкостями основной изоляции исправных вводов на фазах В и С отсутствует. Кроме того, характер изменения значений емкости  $C_2$ , для всех трех вводов полностью совпадает, о чем свидетельствуют как значения коэффициентов парной корреляции из табл. 9, так и зависимости данного показателя от продолжительности эксплуатации, которые приведены на рис. 2 (б). Выполненный анализ не выявил значимой корреляции между значениями сопротивления измерительного вывода для вводов во всех трех фазах (см. табл. 9 и рис. 2 (в)).

Аналогичные результаты получены и для неисправных высоковольтных вводов негерметичной кон-

струкции. В качестве примера в табл. 10–11 приведены результаты корреляционного анализа для высоковольтного ввода типа БМВП – 110, установленного на фазе С выключателя 110 кВ У 110–2000–50У1. Данный ввод был выведен из эксплуатации 02.09.2015 по результатам контроля значения  $\operatorname{tg}\delta_2$ . Как видно из табл. 10, из пяти показателей значимая связь с продолжительностью эксплуатации выявлена для четырех показателей. При этом значения  $\operatorname{tg}\delta_1$ ,  $\operatorname{tg}\delta_2$  и  $C_2$  значительно возрастают с ростом длительности эксплуатации, а значения  $C_1$  значительно снижаются.

Таблица 10 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции и длительностью эксплуатации и между отдельными показателями высоковольтного ввода БМВП – 110, негерметичной конструкции

Показатель	Корреляция между показателями и длительностью эксплуатации	$\operatorname{tg}\delta_1$	$\operatorname{tg}\delta_2$	$C_1$	$C_2$	R
$n=8, r_{\text{крит. } 6, 0.95}=0,707$						
$\operatorname{tg}\delta_1$	<b>0.800</b>	<b>1,00</b>	<b>0.760</b>	<b>-0.842</b>	0.543	<b>-0.715</b>
$\operatorname{tg}\delta_2$	<b>0.751</b>	<b>0.760</b>	<b>1,00</b>	<b>-0.728</b>	0.419	<b>-0.514</b>
$C_1$	<b>-0.859</b>	<b>-0.842</b>	<b>-0.728</b>	<b>1,00</b>	-0.660	0,636
$C_2$	<b>0.855</b>	0.543	0.419	-0.660	<b>1,00</b>	0.148
R	-0.264	<b>-0.715</b>	-0.514	0,636	0.148	<b>1,00</b>

Примечание:  $n$  – количество измерений

Из табл. 10 также видно, что значимая корреляционная связь выявлена не только между показателями, имеющими значимую связь с продолжительностью эксплуатации ( $\operatorname{tg}\delta_1$  и  $\operatorname{tg}\delta_2$ ;  $\operatorname{tg}\delta_1$  и  $C_1$ ;  $\operatorname{tg}\delta_2$  и  $C_1$ ), но и между  $\operatorname{tg}\delta_1$  и R, при том, что сопротивление измерительного вывода не имеет значимой связи с длительностью эксплуатации. Более того, несмотря на то, что и емкости  $C_1$  и  $C_2$ , значительно изменяются во времени, корреляционная связь между этими показателями не выявлена.

В табл. 11 приведены результаты корреляционного анализа между показателями изоляции неисправного ввода (фаза С) и исправных вводов установленных на фазах А и В. Как следует из табл. 11 характер зависимостей  $\operatorname{tg}\delta_1$ ,  $\operatorname{tg}\delta_2$ ,  $C_2$  и R от длительности эксплуатации в исправных вводах совпадает, но отличаются от характера зависимостей данных показателей для неисправного ввода (см. рис. 3 а). В тоже время характер зависимостей емкости основной изоляции от длительности эксплуатации, для исправного ввода фазы В и неисправного ввода фазы С совпадает (см. рис. 3 б). Таким образом, для неисправных высоковольтных вводов как герметичной, так и негерметичной конструкции характерно наличие значимой корреляции между показателями изоляции и продолжительностью эксплуатации, наличие значимой корреляции между показателями изоляции, а также отсутствие значимой корреляции между показателями неисправного ввода и показателями исправных вводов, установленных на соседних фазах.

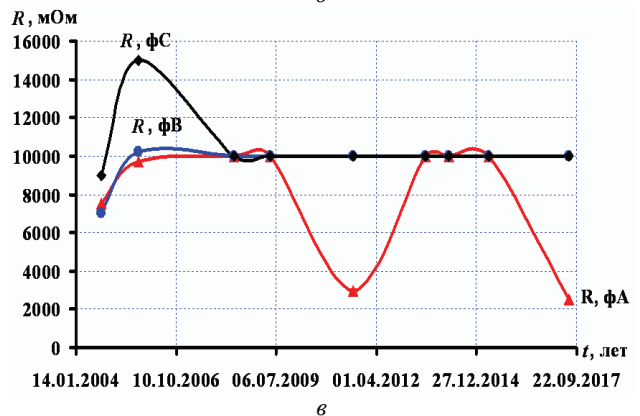
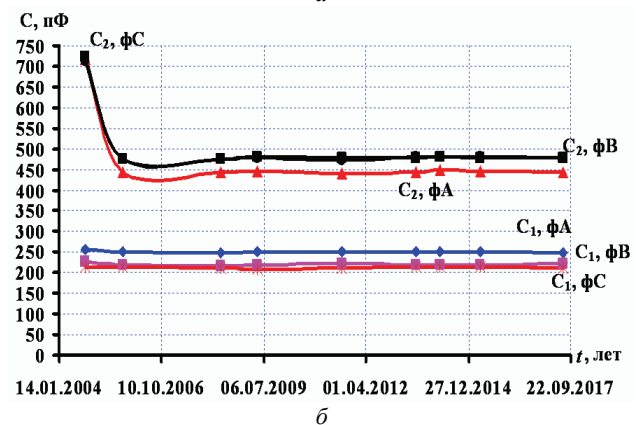
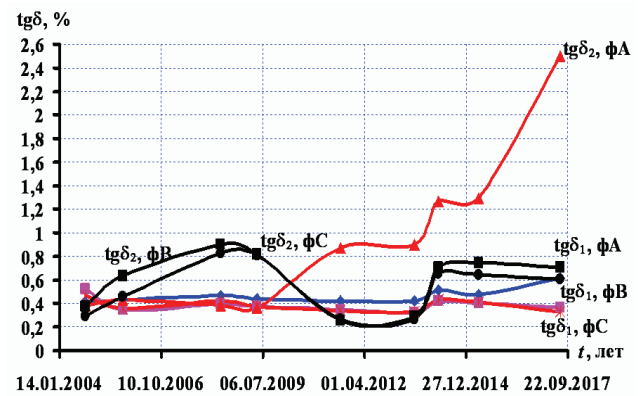


Рис.2. Зависимости показателей изоляции от длительности эксплуатации для неисправного ввода ГМТА–110/630–У1 110 кВ (фаза А) и исправных вводов (фазы В и С): а –  $\operatorname{tg}\delta_1$  и  $\operatorname{tg}\delta_2$ ; б –  $C_1$  и  $C_2$ ; в – R

Таблица 11 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции неисправного ввода БМВП – 110 кВ (фаза С), и показателями исправных вводов установленных на соседних фазах (А и В)

Фаза	$\operatorname{tg}\delta_1/\operatorname{tg}\delta_1$	$\operatorname{tg}\delta_2/\operatorname{tg}\delta_2$	$C_1/C_1$	$C_2/C_2$	R/R
$n=8, r_{\text{крит. } 6, 0.95}=0,707$					
А-В	<b>0,923</b>	<b>0,758</b>	0,244	<b>0,792</b>	<b>0,935</b>
А-С	-0,323	-0,471	0,355	0,075	0,470
В-С	-0,069	-0,388	<b>0,979</b>	0,653	0,691

Для сравнения в табл. 12-13 приведены результаты корреляционного анализа для исправного высоковольтного ввода герметичной конструкции ГМТА–90–110/1000 установленного на фазе А автотрансформатора АТДЦН–200000/330/110.

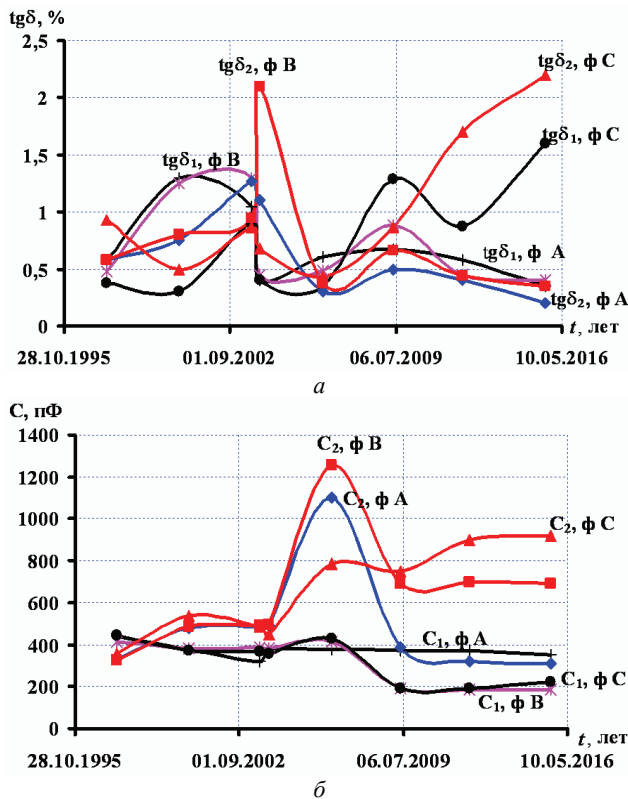


Рис. 3. Зависимости показателей изоляции от длительности эксплуатации для неисправного ввода ГМТА-110/630-У1 110 кВ (фаза А) и исправных вводов (фазы В и С): а) –  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$ ; б) –  $C_1$  и  $C_2$

Таблица 12 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции и длительностью эксплуатации, также между отдельными показателями исправного ввода ГМТА – 90–110/1000

Показатель	Корреляция между показателями и длительностью эксплуатации	$\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2$	$C_1$	$C_2$	R
$n=10$ $r_{\text{крит. } 8, 0.95}=0,632$						
$\text{tg}\delta_1$	-0,255	<b>1,00</b>	-0,444	-0,132	-0,022	0,110
$\text{tg}\delta_2$	0,221	-0,444	<b>1,00</b>	0,145	0,104	-0,010
$C_1$	0,271	-0,132	0,145	<b>1,00</b>	0,505	0,583
$C_2$	0,104	-0,022	0,104	0,505	<b>1,00</b>	0,211
R	-0,439	0,110	-0,010	0,583	0,211	<b>1,00</b>

Как видно из табл. 12, для исправных вводов отсутствует значимая корреляция между продолжительностью эксплуатации и значениями показателей изоляции. Также отсутствует значимая корреляция между значениями показателей.

Следует отметить, что в некоторых исправных вводах была выявлена значимая корреляционная связь между значениями  $C_1$  и  $C_2$ , однако значимая связь между остальными показателями отсутствует. Анализируя данные приведенные в табл. 13, легко увидеть, что для исправных высоковольтных вводов имеет место наличие значимой корреляции между значениями показателей для всех трех фаз, исключение может составлять сопротивление измерительного вывода.

Таблица 13 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции исправного высоковольтного ввода ГМТА – 90–110/1000 (фаза А) и показателями исправных вводов, установленных на соседних фазах (В и С)

Фаза	$\text{tg}\delta_1/\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2/\text{tg}\delta_2$	$C_1/C_1$	$C_2/C_2$	R/R
$n=12$ $r_{\text{крит. } 10, 0.95}=0,576$					
A-B	<b>0,870</b>	<b>0,929</b>	<b>0,740</b>	<b>0,686</b>	0,519
A-C	<b>0,781</b>	<b>0,963</b>	<b>0,892</b>	<b>0,897</b>	<b>1,000</b>
B-C	<b>0,968</b>	<b>0,968</b>	<b>0,871</b>	<b>0,755</b>	0,519

На рис. 4 приведены зависимости показателей изоляции от длительности эксплуатации для исправного ввода ГМТА-90–110/1000 (фаза А) и исправных вводов (фазы В и С).

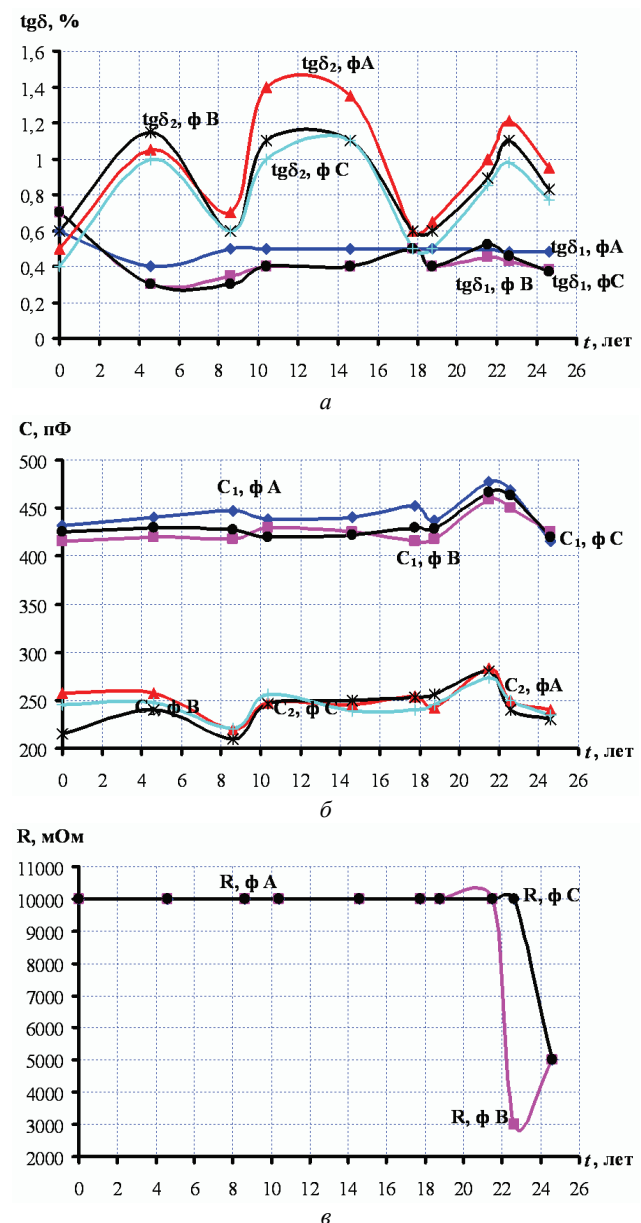


Рис. 4. Зависимости показателей изоляции от длительности эксплуатации для исправного ввода ГМТА-90-110/1000 (фаза А) и исправных вводов (фазы В и С): а –  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$ ; б –  $C_1$  и  $C_2$ ; в –  $R$ ;

Как видно из рис.4, значения показателей изоля-

ции в исправных вводах, установленных на разных фазах, несколько отличаются, что может привести к росту тока небаланса, при непрерывном контроле состояния вводов неравномерно – компенсационным методом. В тоже время динамика изменения показателей изоляции во времени идентична, что позволяет более точно выполнять сравнение состояния изоляции вводов установленных на соседних фазах оборудования. Как показывают результаты регрессионного анализа, которые приведены в табл. 5–6, для исправных высоковольтных вводов может иметь место значимая зависимость показателей от продолжительности эксплуатации.

В связи с этим представляет практический интерес проанализировать корреляционные связи между продолжительностью эксплуатации и показателями изоляции, а также между отдельными показателями в таких вводах. А также проанализировать корреляционные связи между показателями во вводах, установленных на соседних фазах оборудования. В качестве примера проанализируем корреляционные связи в исправном высоковольтном вводе негерметичной конструкции типа БМТ–110/600, установленном на фазе А силового трансформатора. По результатам регрессионного анализа для данного ввода выявлено наличие значимой систематической составляющей тангенса угла диэлектрических потерь на продолжительность эксплуатации. Результаты корреляционного анализа показателей для данного ввода приведены в табл. 14 и 15. А зависимости показателей изоляции от продолжительности эксплуатации приведены на рис. 5.

Таблица 14 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции и длительностью эксплуатации и между отдельными показателями исправного ввода БМТ–110/600

Показатель	Корреляция между показателями и длительностью эксплуатации	$\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2$	$C_1$	$C_2$	R
$n=12$ $r_{\text{крит. } 10, 0,95}=0,576$						
$\text{tg}\delta_1$	<b>0,814</b>	<b>1,00</b>	-0,288	0,372	0,271	-0,090
$\text{tg}\delta_2$	-0,147	0,288	<b>1,00</b>	0,003	0,118	-0,455
$C_1$	0,478	0,372	0,003	<b>1,00</b>	<b>0,961</b>	-0,362
$C_2$	0,308	0,271	0,118	<b>0,961</b>	<b>1,00</b>	-0,411
R	0,027	0,090	-0,455	-0,362	-0,411	<b>1,00</b>

Таблица 15 – Корреляционные связи между значениями показателей изоляции исправного ввода БМТ–110/600 (фаза А) и показателями исправных вводов установленных на соседних фазах (В и С)

Фаза	$\text{tg}\delta_1/\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2/\text{tg}\delta_2$	$C_1/C_1$	$C_2/C_2$	R/R
$n=12$ $r_{\text{крит. } 10, 0,95}=0,576$					
А-В	<b>0,693</b>	<b>0,891</b>	<b>0,958</b>	<b>0,833</b>	<b>0,907</b>
А-С	<b>0,744</b>	<b>0,747</b>	-0,141	0,308	<b>0,936</b>
В-С	<b>0,812</b>	<b>0,801</b>	0,086	0,652	<b>0,978</b>

Как видно из табл. 14, значимая корреляция между показателями изоляции и длительностью экс-

плуатации выявлена только для  $\text{tg}\delta_1$ . При этом данный показатель не имеет статистически значимой связи ни с одним другим показателем. Значимая связь выявлена только для показателей  $C_1$  и  $C_2$ , что характерно для исправных вводов. Анализируя данные табл. 15 легко увидеть, что практически все показатели изоляции вводов установленных на соседних фазах значимо коррелированы между собой, что наглядно иллюстрируют зависимости, приведенные на рис. 5. Это свидетельствует о том, что рост значений  $\text{tg}\delta_1$  как во вводе фазы А, так и во вводах на соседних фазах обусловлен одной и той же причиной, чего не наблюдается в неисправных вводах.

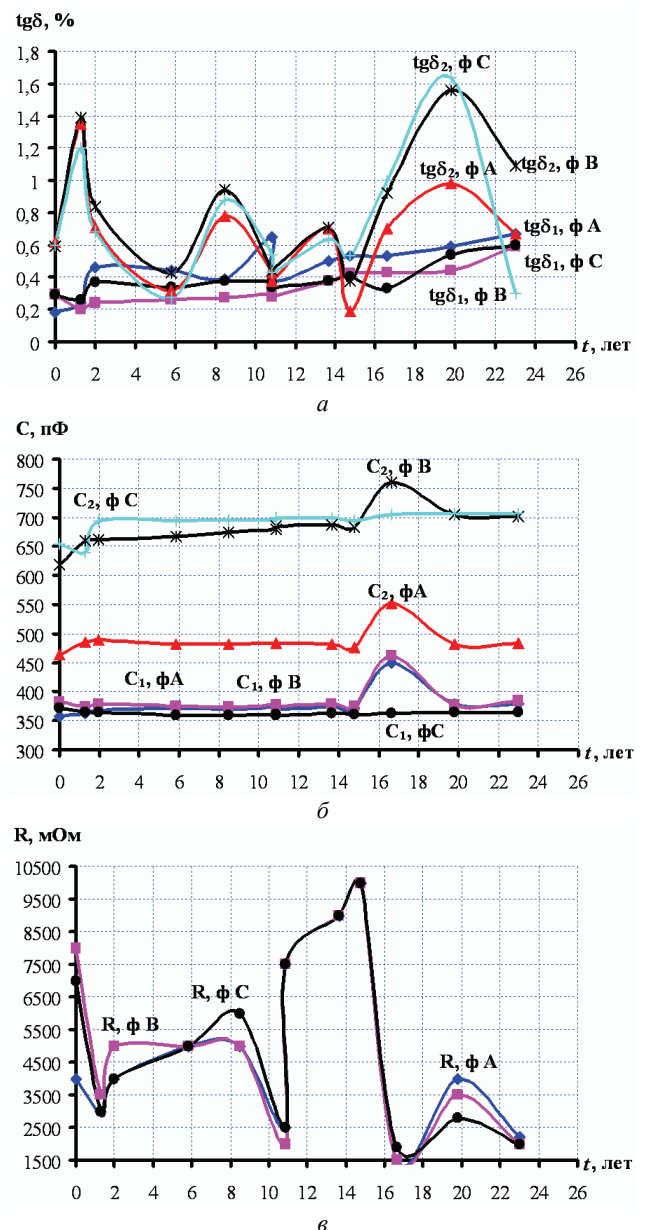


Рис. 5. Зависимости показателей изоляции от длительности эксплуатации для исправного ввода БМТ–110/600 (фаза А) и исправных вводов (фазы В и С)  
а –  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$ ; б –  $C_1$  и  $C_2$ ; в – R

Более того, наличие значимой корреляции между значениями показателей в исправных вводах выявлено



и в тех случаях, когда значения показателей изоляции превышают предельно допустимые значения в результате нарушений при проведении испытаний. Последнее обстоятельство является крайне важным, поскольку позволяет установить причину роста значений показателей и минимизировать ошибочную отбраковку вводов. Таким образом, для исправных высоковольтных вводов как герметичной так и негерметичной конструкции характерно отсутствие значимой корреляции между показателями изоляции и продолжительностью эксплуатации, практическое отсутствие значимой корреляции между показателями изоляции (за исключением  $C_1$  и  $C_3$ ), а также наличие значимой корреляции между показателями изоляции вводов, установленных на соседних фазах. При наличии значимой корреляции между продолжительностью эксплуатации и одним из показателей изоляции в исправных вводах, как правило, имеет место наличие значимой корреляции между показателями вводов установленных на соседних фазах оборудования.

**Выводы.** Выполненные исследования показали, что в высоковольтных вводах с разным состоянием имеет место не только различие в численном значении показателей изоляции, что известно и широко используется, но и существенное различие в динамике изменения показателей во времени, что может быть использовано для диагностики состояния высоковольтных вводов. Так для исправных высоковольтных вводов как герметичной так и негерметичной конструкции характерно практическое отсутствие значимой систематической составляющей в зависимостях показателей от продолжительности эксплуатации (отсутствие значимой корреляции между показателями изоляции и продолжительностью эксплуатации), практическое отсутствие значимой корреляции между показателями изоляции (за исключением  $C_1$  и  $C_2$ ), а также наличие значимой корреляции между показателями изоляции вводов, установленных на соседних фазах. При наличии значимой корреляции между продолжительностью эксплуатации и одним из показателей изоляции в исправных вводах, как правило, имеет место наличие значимой корреляции между показателями вводов установленных на соседних фазах оборудования. Для неисправных высоковольтных вводов как герметичной, так и негерметичной конструкции характерно наличие значимой систематической составляющей в зависимостях показателей от продолжительности эксплуатации (наличие значимой корреляции между показателями изоляции и продолжительностью эксплуатации), наличие значимой корреляции между показателями изоляции, а также отсутствие значимой корреляции между показателями неисправного ввода и показателями исправных вводов, установленных на соседних фазах. Поскольку выявленные различия в характере зависимостей могут быть обнаружены еще до того, как значения показателей выйдут за предельно допустимые значения, то эти различия позволяют определять дефекты вводов на ранней стадии их развития.

## Список литературы

1. Рубаненко О.С., Гуменюк О.І. Високовольтні вводи. Конструкція, експлуатація, діагностика і ремонт. Вінниця: ВНТУ, 2011. 183 с.
2. Жорняк Л.Б., Райкова Е.Ю., Осинская В.И. Повышение надежности и эффективности высоковольтных вводов. Вісник КДПУ імені Остроградського. 2008. Т. 4. С. 95–99.
3. Андриенко П.Д., Сахно А.А., Конограй С.П., Спица А.Г., Скрупская Л.С. Особенности мониторинга технического состояния основной изоляции высоковольтных вводов и трансформаторов тока. Електротехніка і електроенергетика. 2014. № 1. С. 43–48.
4. Кассихин С.Д., Сипилкин К.Г., Славинский А.З., Устинов В.Н., Пинталь Ю.С., Верещагин М.Б. Оценка эффективности и целесообразности диагностики высоковольтных вводов на основе опыта эксплуатации. Екатеринбург: Издательский дом «Автограф». 2010. 232 с.
5. Feilat E.A. Analysis of the Root Causes of Transformer Bushing Failures. Int. J. Comput. Electr. Autom. Control Inf. Eng. 2013. Vol. 7. PP. 791–796.
6. Anglhuber Martin, Velásquez Juan L. Contreras Dispersing the clouds – gain clear insight into your bushings using advanced diagnostics method. Transformer Magazine. Special Edition: Bushing. 2017. PP. 126–132.
7. Septyani H.I., Arifianto I., Purnomoadi A.P. High voltage transformer bushing problems. Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2011. International Conference on. IEEE. 2011. PP. 1–4.
8. Metwally I.A., Metwally I.A. Failures, monitoring and new trends of power transformers. IEEE Potentials. 2011. Vol. 30, iss. 03. PP. 36–43.
9. IEC – 60137. Edition 7.0 2017 – 06, International Electro-technical Commission Standard for Insulated bushings for Alternating Voltages Above 1000 V.
10. IEEE Std C57.19.01: Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Apparatus Bushings, 2000.
11. Норми випробування електрообладнання : СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Офіц. вид., приказ Міністерства енергетики України, 2007. 262 с. (Нормативний документ Міністерства енергетики України).
12. Mehta Amit, Sharma R.N., Chauhan Sushil, Agnihotri S.D. Study the Insulation System of Power Transformer Bushing. International Journal of Computer and Electrical Engineering. August 2011. Vol. 3, no. 4. PP. 544–547.
13. Tan D., Li H., Xiao D. Analysis on Failure causes of bushing used in 40.5 kV metal enclosed air insulation switchgear. Electricity Distribution (CICED), 2014. China International Conference on. IEEE. 2014. C. 1225–1229.
14. Bo Qi, Quanmin Dai, Chengrong Li, Zipeng Zeng, Mingli Fu, Ran Zhuo The Mechanism and Diagnosis of Insulation Deterioration Caused by Moisture Ingress into Oil-Impregnated Paper Bushing. Energies. 2018. Т. 11, №. 6. PP. 1496. doi:10.3390/en11061496.
15. Бондаренко В.Е., Щапов П.Ф., Шутенко О.В. Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел. Харків: НТУ «ХПИ». 2007. 452 с.
16. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Оптимизация системы информационных показателей качества трансформаторного масла для технического эксплуатационного контроля маслonaполненного энергетического оборудования. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Харків: УДАЗТ. 2003. №2. С. 46–50.
17. Бондаренко В.О., Шутенко О.В. Усовершенствование процедуры принятия решений при оценке степени ста-

рения трансформаторных масел. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 1. С. 17 – 21.

18. Шутенко О.В. Метод обнаружения развивающихся дефектов высоковольтных трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов. Электрические сети и системы. 2010. № 3. С. 38–45.

19. Shutenko O. Method for Detection of Developing Defects in High-Voltage Power Transformers by Results of the Analysis of Dissolved Oil Gases. Acta Electrotechnica et Informatica. 2018. Vol. 18, № 1. PP. 11–8. doi: 10.15546/aei-2018-0002.

20. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. М.: Мир. 1981. 520 с.

21. Шутенко О.В., Баклай Д.Н. Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных. Харьков: НТУ «ХПИ». 2013. 268 с.

22. Шутенко О.В., Загайнова А.А., Сердюкова Г.Н. Анализ влияния условий и режимов эксплуатации на техническое состояние основной изоляции высоковольтных вводов различной конструкции. Электротехника і електромеханіка. Харків: НТУ «ХПІ». 2019. № 1. С. 33–42. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.08.

23. Кенделл М., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. Москва: Наука, 1976. 736 с.

24. Seber G.A. Linear regression analysis. John Wiley and Sons: New York. London – Sydney – Toronto 1977. 456 p.

25. Шеффер Г. Дисперсионный анализ. Москва: Наука. 1980, 512с.

26. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва: Высш. шк., 1977. 479 с.

## References (transliterated)

1. Rubanenko O. Ye., Humenyuk O. I. Vysokovol'tni vvody. Konstruktsiya, ekspluatatsiya, diahnostyka i remont [High-voltage bushing. Design, operation, diagnostics and repair]. Vinnytsya, VNTU. 2011. 183 p.

2. Zhornyak L.B., Raykova E.Yu., Osinskaya V.I. Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti vysokovol'tnykh vvodov [Increase in reliability and efficiency of high-voltage bushing]. Visnyk KDPU imeni Ostrohrads'koho. 2008. Vol. 4. PP. 95–99.

3. Andrienko P.D. Sakhno A.A., Konogray S.P., Spitsa A.G., Skrupskaya L.S. Osobennosti monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnoy izolyatsii vysokovol'tnykh vvodov i transformatorov toka [Features of monitoring of technical condition of the main isolation of high-voltage bushing and current transformers]. Elektrotehnika i elektroenerhetyka. 2014. No. 1. PP. 43–48.

4. Kassikhin S.D., Sipilkin K.G., Slavinskiy A.Z., Ustinov V.N., Pital' Yu.S., Vereshchagin M.B. Otsenka effektivnosti i tselesoobraznosti diagnostiki vysokovol'tnykh vvodov na osnove opyta ekspluatatsii [Assessment of effectiveness and expediency of diagnostics of high-voltage inputs bushing on the basis of operating experience]. Ekaterinburg: Izdatel'skiy dom «AvtoGRAF», 2010. 232 p.

5. Feilat E.A. Analysis of the Root Causes of Transformer Bushing Failures. Int. J. Comput. Electr. Autom. Control Inf. Eng. 2013. Vol. 7. PP. 791–796.

6. Anglhuber Martin, Velásquez Juan L. Contreras Dispersing the clouds – gain clear insight into your bushings using advanced diagnostics method. Transformer Magazine. Special Edition: Bushing. 2017. PP. 126–132.

7. Septyani H.I., Arifianto I., Purnomoadi A.P. High voltage transformer bushing problems. Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2011. International Conference on. IEEE. 2011. PP. 1–4.

8. Metwally I.A., Metwally I.A. Failures, monitoring and new trends of power transformers. IEEE Potentials. 2011. Vol. 30. iss. 03. PP. 36–43.

9. IEC – 60137, Edition 7.0 2017 – 06. International Electro-technical Commission Standard for Insulated bushings for Alternating Voltages Above 1000 V.

10. IEEE Std C57.19.01: Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Apparatus Bushings, 2000.

11. Normy vyprovuvannya elektroobladnannya: SOU-NEE 20.302:2007 [Norms of test of electric equipment: SOU-NEE 20.302:2007] Ofits. vyd., prykaz Minpalyvernerho 2007-01-15 h. No.13. Kyiv: OEP «HRYFRE»: M-vo palyva ta enerhetyky Ukrainy, 2007. 262 p.

12. Mehta Amit, Sharma R.N., Chauhan Sushil, Agnihotri S.D. Study the Insulation System of Power Transformer Bushing. International Journal of Computer and Electrical Engineering. August 2011. Vol. 3, No. 4. PP. 544–547.

13. Tan D., Li H., Xiao D. Analysis on Failure causes of bushing used in 40.5 kV metal enclosed air insulation switchgear. Electricity Distribution (CICED), 2014. China International Conference on. – IEEE. 2014. PP. 1225–1229.

14. Bo Qi, Quanmin Dai, Chengrong Li, Zipeng Zeng, Mingli Fu and Ran Zhuo The Mechanism and Diagnosis of Insulation Deterioration Caused by Moisture Ingress into Oil-Impregnated Paper Bushing. Energies. 2018. Vol. 11, no. 6. PP. 1496. doi:10.3390/en11061496.

15. Bondarenko V.E., Shchapov P.F., Shutenko O.V. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsionnogo izmeritel'nogo kontrolya transformatornykh masel [Increase in effectiveness of operational measuring monitoring of transformer oils]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2007. 452 p.

16. Bondarenko V.E., Shutenko O.V. Optimizatsiya sistemy informatsionnykh pokazateley kachestva transformatornogo masla dlya tekhnicheskogo ekspluatatsionnogo kontrolya maslonapolnennogo energeticheskogo oborudovaniya [Optimization of a system of information indicators of quality of a transformer oil for technical operational monitoring of an oil-filled power inventory]. Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti. Kharkiv: UDAZT, 2003. No.2. PP. 46–50.

17. Bondarenko V.O., Shutenko O.V. Usovershenstvovaniye protsedury prinyatiya resheniy pri otsenke stepeni stareniya transformatornykh masel [Improvement of the procedure of a decision making at assessment of extent of aging of transformer oils]. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. 2009. No.1. PP. 17 – 21.

18. Shutenko O.V. Metod obnaruzheniya razvivayushchikhsya defektov vysokovol'tnykh transformatorov po rezul'tatam khromatograficheskogo analiza rastvorenykh v masle gazov [Method of detection of the developing defects of high-voltage transformers by results of a stratographic analysis of the gases dissolved in oil]. Elektricheskie seti i sistemy. 2010. No. 3. PP. 38–45.

19. Shutenko O. Method for Detection of Developing Defects in High-Voltage Power Transformers by Results of the Analysis of Dissolved Oil Gases. Acta Electrotechnica et Informatica. 2018. Vol. 18, No. 1. PP 11–8. DOI: 10.15546/aei-2018-0002.

20. Dzhonson N., Lion F. Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke [Statistics and scheduling of an experiment in technique and science]. Moscow: Mir, 1981. 520 p.

21. Shutenko O.V., Baklay D.N. Planirovanie eksperimental'nykh issledovaniy v elektroenergetike. Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh [Scheduling of the pilot studies in power industry. Methods of data interpretation.]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. 268 p.

22. Shutenko O.V., Zagaynova A.A., Serdyukova G.N.

Analiz vliyaniya usloviy i rezhimov ekspluatatsii na tekhnicheskoe sostoyanie osnovnoy izolyatsii vysokovol'tnykh vvodov razlichnoy konstruktzii [Analysis of influence of conditions and modes of operation on technical condition of the main isolation of high-voltage inputs of various design]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2019. No. 1. PP. 33–42. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.08.

23. Kendell M. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz i vremennyye ryady* [Multidimensional statistical analysis and time

series]. Moscow: Nauka, 1976. PP. 736.

24. Seber G.A. *Linear regression analysis*. John Wiley and Sons: New York. London – Sydney – Toronto, 1977. 456 p.

25. Sheffer G. *Dispersionnyy analiz* [Dispersion analysis]. Moscow: Nauka, 1980. 512 p.

26. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vyssh. shk., 1977. 479 p.

*Поступила (received) 25.04.2019*

#### *Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Шутенко Олег Володимирович (Шутенко Олег Владимирович, Shutenko Oleg)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3141-7709>, e-mail: o.v. shutenko@gmail.com

**Загайнова Олександра Анатоліївна (Загайнова Александра Анатольевна, Zagaynova Alexandra)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8558-3211>, e-mail: zagaynova@mail.com